



·大科学装置运维·

400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器 在线洁净度实验研究*

吴文龙, 刘勇, 强永发, 王振国, 熊迁, 李珂, 刘建国,
王琳, 林东晖, 陈林, 苗心向, 姚轲

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要: 在氙灯放电泵浦过程中, 片状放大器片腔内材料在高强度氙灯光辐照下, 存在显著的热解过程, 产生大量的 μm 级悬浮粒子。针对放大器在线洁净度控制, 采取了包括选用有利于洁净控制的材料、消除盲孔与焊缝、深度酸洗刻蚀、高压喷淋清洗和最终的光照清洗等系列有效措施。实验研究结果表明: 经过 100 发次光照清洗, 片腔内气溶胶颗粒处于 300~1000 之间, 接近美国国家点火装置(NIF) 洁净水平; 发次运行完成后, 利用约 0.4 m/s 的氮氧混合气体对放大器腔体进行吹扫, 气溶胶颗粒在 2 min 内可恢复至 0 值。

关键词: 片状放大器; 洁净度; 气溶胶; 光学表面损伤

中图分类号: TN248.1; O368

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220358

Experimental study on online cleanliness of the 400 mm aperture 4×2 combined slab amplifier

Wu Wenlong, Liu Yong, Qiang Yongfa, Wang Zhenguo, Xiong Qian, Li Ke,
Liu Jianguo, Wang Lin, Lin Donghui, Chen lin, Miao Xinxiang, Yao Ke

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In the discharge pumping process of xenon lamp, there is a significant pyrolysis process of the materials in the cavity of the slab amplifier under the irradiation of high intensity xenon light, which produces a large number of micron sized suspended particles. For the online cleanliness control of the amplifier, a series of effective measures were taken, including the selection of materials conducive to the cleanliness control, elimination of blind holes and welds, deep pickling and etching, high-pressure spray cleaning and final light cleaning. The experimental results show that after 100 times of light cleaning, the aerosol particles in the chamber are between 300 and 1000, which is close to the cleanliness level of the American National Ignition Facility (NIF) Project; After the operation of the generator is completed, the amplifier chamber is purged with a mixture of nitrogen and oxygen of about 0.4 m/s, and the aerosol particles can recover to zero within 2 minutes.

Key words: slab amplifier, cleanliness, aerosol, optical surface damage

目前氙灯泵浦钨玻璃片的口径为 400 mm、4×2 组合式片状放大器系统广泛应用于 ICF 研究的高功率激光装置, 如美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳装置(LMJ)与中国的神光系列激光装置等^[1-5], 钨玻璃尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm, 与光束呈布儒斯特角放置, 可提供 400 mm×400 mm 的正方形通光口径。片状放大器常规运行过程中, 经放大后通过钨玻璃片的最大激光通量可达到约 15 J/cm²(脉宽为数 ns), 因此钨玻璃片表面洁净度至关重要, 否则将引起元件表面损伤^[6]。运行过程中钨玻璃片受到的氙灯光辐照通量约 13 J/cm²(脉宽为 400~500 μs), 因此放大器腔体结构材料表面残余的有机污染物与用于吸收放大自发辐射(ASE)的钨玻璃片包边的粘接材料等在高强度氙灯光辐照下碳化形成悬浮颗粒(气溶胶), 直径为亚 μm 至 μm 量级。其中亚 μm 量级的小的微粒是在氙灯光

* 收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2023-02-21

基金项目: 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD6-2022-7)

联系方式: 吴文龙, wwl803sc@caep.cn。

通信作者: 苗心向, miaoxinxiang@caep.cn。

辐照后很短时间内就形成了,而数 μm 左右的粒子簇是在氙灯光熄灭后那些较小的颗粒高速碰撞,热气流将较小的气溶胶迅速地混合起来形成较大尺度的颗粒。悬浮颗粒在沉降过程中容易附着在钕玻璃片表面,强激光通过时将导致片表面损伤^[7-9]。因此研究高功率激光放大器片腔洁净度以及如何快速消除放大器每次工作之后形成的气溶胶,对激光装置的运行维护以及延长激光增益介质的寿命是至关重要的。

2001 年於海武等人利用一台单口径放大器(SSA)开展了相关实验研究,发次运行完成后片腔洁净度通常能达到 100000~500000 级气溶胶的水平(在粒子直径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的水平上)^[10]; 2012 年程晓锋等人利用一组 4×2 片状放大器开展了实验研究,发次运行完成后腔体内气溶胶维持在 5000~10000 之间^[11-12]。本文利用一组 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器开展了实验研究,经过系列洁净控制措施,片腔内气溶胶颗粒处于 300~1000 之间,接近美国国家点火装置;发次运行完成后,利用约 0.4 m/s 的氮氧混合气体进行腔体的吹扫,气溶胶颗粒在 2 min 内可恢复至 0 值,预期可大幅降低钕玻璃片在运行过程中损伤的几率。

1 实验装置

实验装置为一组 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器,如图 1 所示。放大器高度方向为四片钕玻璃片叠加,形成四个通光子口径,宽度方向有两个通光子口径,总体形成 4×2 的通光口径。

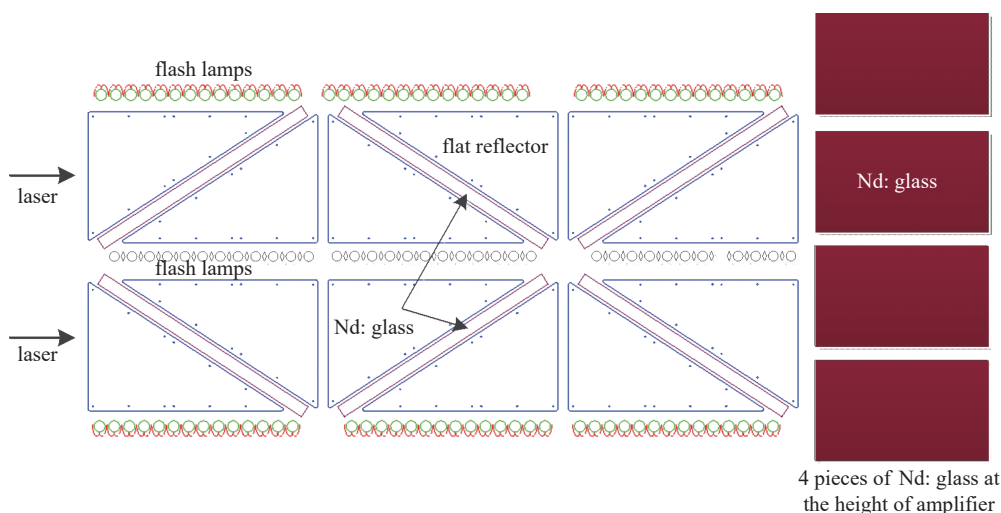


Fig. 1 Schematic diagram of 400 mm aperture 4×2 combined slab amplifier

图 1 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器示意图

钕玻璃尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm,氙灯从两侧对钕玻璃片进行泵浦,工作电压为 31 kV,脉宽 450 μs 。沿激光方向一个口径内钕玻璃片为未包边的假片,另外一个口径内高度方向其中一束为钕玻璃真片(侧面包边),其余也为假片。灯箱与钕玻璃片之间有隔板玻璃进行隔断。吹扫冷却气体从放大器顶部顶入,自上而下完成吹扫,排气口在放大器底部,在放大器腔体内吹扫气体的断面平均风速为 0.2~0.5 m/s 可调。在放大器底部通过 1 个 KF16 采样孔进行气溶胶浓度的采样测量,测量设备为粒子计数器,该计数器可以以取样方式计量分别大于 0.3、0.5、1、2、5、10 μm 粒径或介于它们之间的粒子数。

2 实验研究结果

为控制放大器腔体内部的洁净度,采取了一系列措施,包括放大器腔体的主体结构选用低碳含量的 304 不锈钢材料并进行了酸洗处理(表面刻蚀深度约 5 μm)与洁净高纯水的喷淋清洗以尽量去除表面有机物、腔体结构上消除了盲孔以避免污染物沉积、对腔体内部焊缝进行了严格检查并消除了焊缝以避免污染物沉积、对腔体内部聚四氟乙烯等有机材料采取了封闭处理以避免氙灯光直接辐照等。同时为验证钕玻璃表面洁净处理工艺以及用于吸收放大自发辐射(ASE)的钕玻璃片包边的粘接材料等在氙灯辐照下对腔体洁净度的影响,利用了两个独立腔室开展了对比实验,如表 1 所示。

在洁净实验室完成集成安装后开展腔体光照清洗,假片腔室与真片腔室气溶胶颗粒数峰值随光照清洗发次变化情况如图 2 所示。假片腔室与真片腔室在前两发次所产生的气溶胶颗粒数峰值基本相当,其中 0.5 μm 的颗粒处于 40000~50000 量级。二者均随发次增加而逐步下降,其中假片片腔下降趋势比较明显,在完成了约 30 发次光照清洗后 0.5 μm 的颗粒数下降至 3000 左右,随发次增加至 100 发左右,此时 0.5 μm 的颗粒数下降至 300 左右,与

表 1 真片腔室与假片腔室状态对比

Table 1 Comparison of real slab chamber and false slab chamber

slab cavity	status of slab	surface cleaning process of slab	status of partition glass
real slab cavity	There are 4 slabs in total, of which 1 is a real one (with edging treatment completed) and 3 are fake ones (without edging treatment).	wiping and cleaning the surface of the real slab and ultrasonic cleaning the fake slabs	The surface of partition glass is coated with a chemical film that can enhance the transmission of xenon light.
fake slab cavity	there are 4 fake slabs in total	ultrasonic cleaning	ordinary glass without chemical film

NIF 的洁净水平接近；真片片腔随发次总体呈下降趋势，但不如假片片腔明显，在完成了约 30 发次光照清洗后 0.5 μm 的颗粒数下降至 10000 左右，随发次增加至 100 发左右，此时 0.5 μm 的颗粒数下降至 1000 左右。

发次运行完成后利用超净气体对片腔开展吹扫，经测试气源中的 0.5 μm 颗粒为 0 值。在吹扫条件下片腔内 0.5 μm 颗粒密度变化情况如图 3 所示，其中在入口风速为 12 m/s(腔室内断面风速平均值约为 0.4 m/s)时，片腔内 0.5 μm 颗粒密度可在 2 min 内从数千/立方英尺恢复至 0 值；入口风速降至 6 m/s 时片腔颗粒恢复时间将额外增加 1 min。

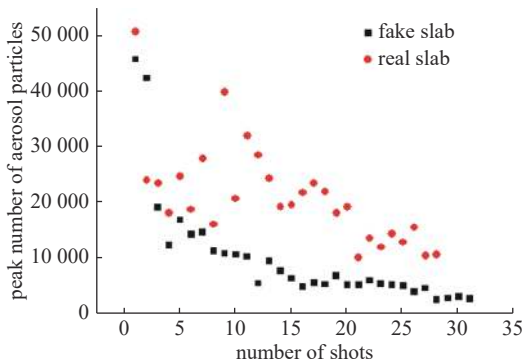


Fig. 2 Change of aerosol particle number's peak value with light cleaning times

图 2 气溶胶颗粒数峰值随光照清洗发次变化情况

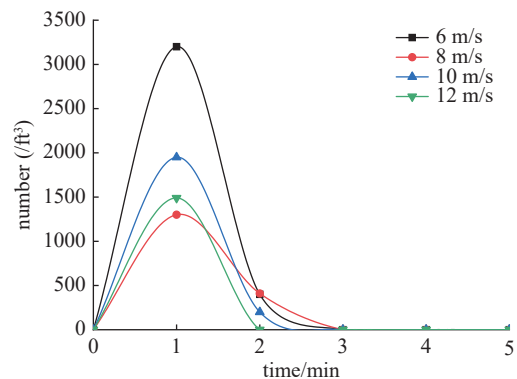


Fig. 3 Variation of 0.5 μm particle density in the cavity under different purging conditions

图 3 不同吹扫条件下片腔内 0.5 μm 颗粒密度变化情况

3 分析与讨论

从气溶胶颗粒密度下降趋势看，片状放大器腔体内残余的有机物在经历 1~2 次强氙灯光辐照后大部分将被分解气化；在对有机材料均采取有效封闭处理后，腔体内气溶胶颗粒密度将随发次逐渐降低，这将有利于装置的长期运行。

从真、假片腔室的对比结果看，用于吸收放大自发辐射 (ASE) 的铍玻璃片包边的粘接材料与清洗不彻底是气溶胶密度下降缓慢的主要原因，假片的超声波清洗有效改善了这一情况。

从片腔内气溶胶颗粒密度在吹扫条件下恢复情况看，恢复速度与吹扫气量呈正比关系，快速的洁净恢复将有效避免气溶胶在铍玻璃片表面的附着，从而降低铍玻璃片由于表面污染导致的损伤几率。

4 结论

本文中，我们通过一组 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的洁净实验研究，证明了目前所采取的洁净管控措施的有效性，包括放大器腔体的主体结构选用低碳含量的 304 不锈钢材料与酸洗处理(表面深度刻蚀)、腔体结构上消除了盲孔、对腔体内部焊缝进行了严格检查并消除了焊缝、对腔体内部聚四氟乙烯等有机材料采取了封闭处理等。经 100 发次左右光照清洗处理，发次运行完成后片腔内气溶胶密度将维持在较低的水平，同时利用超净气体进行吹扫可实现洁净的快速恢复，这将对铍玻璃片形成有效保护，大幅降低由于污染诱导损伤的几率。

参考文献：

[1] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, et al. National Ignition Facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
 [2] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
 [3] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
 [4] Horvath J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design[R]. UCRL-JC-124520, 1996.

- [5] He X T, Zhang W Y. Inertial fusion research in China[J]. [The European Physical Journal D](#), 2007, 44(2): 227-231.
- [6] Honig J. Cleanliness improvements of National Ignition Facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers[J]. [Optical Engineering](#), 2004, 43(12): 2904-2911.
- [7] Honig J. Offline slab damage experiments comparing air and nitrogen purge[R]. NIF-0070328, 2001: 22-29.
- [8] Honig J, Ravizza D. Nova retrospective and possible implications for NIF[R]. NIF-0110227, 1999.
- [9] Spaeth M L, Manes K R, Honig J. Cleanliness for the NIF 1ω laser amplifiers[J]. [Fusion Science and Technology](#), 2016, 69(1): 250-264.
- [10] 於海武, 郑万国, 唐军, 等. 高功率激光放大器片腔洁净度实验研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2001, 13(3): 272-276. (Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Tang Jun, et al. Investigation of slab cavity cleanliness of high power laser amplifiers[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2001, 13(3): 272-276)
- [11] 程晓锋, 苗心向, 陈远斌, 等. 神光-III主机激光装置片状放大器洁净控制进展[J]. [强激光与粒子束](#), 2012, 24(1): 1-2. (Cheng Xiaofeng, Miao Xinxiang, Chen Yuanbin, et al. Development on cleanliness control of slab amplifiers for Shenguang-III laser driver[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2012, 24(1): 1-2)
- [12] 程晓锋, 王洪彬, 苗心向, 等. 高功率固体激光驱动器污染控制及片状放大器洁净度改进[J]. [强激光与粒子束](#), 2013, 25(5): 1147-1151. (Cheng Xiaofeng, Wang Hongbin, Miao Xinxiang, et al. Contamination control for high-power solid-state laser driver and improvement of cleanliness in slab amplifiers[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(5): 1147-1151)